



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH-07
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**SIMULAÇÃO DINÂMICA APLICADA NA MANUTENÇÃO DE REGULADORES DE VELOCIDADE DE
TURBINAS HIDRÁULICAS**

Luiz Antonio Haddad Rodrigues *
UFSC/EMC/LASHIP

Victor Juliano De Negri
UFSC/EMC/LASHIP

João Marcos Castro Soares
REIVAX AUTOMAÇÃO E CONTROLE

RESUMO

Este artigo apresenta uma técnica de análise de falhas utilizando simulações dinâmicas do Sistema Hidráulico dos Reguladores de Velocidade para a busca sistematizada das causas de efeitos indesejados no sistema de regulação. Sabe-se que cerca de 80% do tempo médio dispendido na manutenção corretiva de sistemas hidráulicos está associado à procura do defeito e 20% refere-se à eliminação do defeito. Considerando-se que a simulação dinâmica é hoje uma ferramenta facilmente aplicável, dada a existência de uma anomalia ou falha no sistema (perda total ou parcial da função principal) pode-se adotar os princípios da metodologia descrita neste artigo para encontrar as causas da falha, em tempo menor, minimizando o tempo de parada da máquina.

PALAVRAS-CHAVE

Manutenção de Reguladores de Velocidade, Simulação Dinâmica de Sistemas Hidráulicos de Controle, Análise de falhas em Sistemas Hidráulicos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em Centrais Hidrelétricas a disponibilidade das máquinas é um parâmetro que deve sempre ser maximizado. O Regulador de Velocidade é um dos principais subsistemas de controle da turbina hidráulica e responsável pelo controle da potência gerada. O projeto desses sistemas deve correlacionar manutenibilidade e confiabilidade com o intuito de assegurar a sua disponibilidade (9). Nesse sentido, um novo método de análise que diminua o tempo para encontrar as causas de falhas, aplicadas no Sistema Hidráulico de Controle de Reguladores de Velocidade, pode contribuir para o aumento da disponibilidade.

Essa técnica pode apoiar diretamente os procedimentos para a manutenção corretiva nas situações de perda total ou parcial da função do sistema (controle de posição) e com a necessidade de intervenção para a realização de reparos.

2.0 METODOLOGIA PARA MANUTENÇÃO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS DE CONTROLE

Os Sistemas Hidráulicos de Controle podem ter como função principal o controle de posição, força ou velocidade. Necessariamente no caso de controle de posição e opcionalmente nas demais situações, esses sistemas dispõem de malhas de controle com realimentações dos sinais de posição, força ou velocidade, que são processados por um controlador. Um Sistema Hidráulico de Controle, juntamente com a unidade de suprimento de energia hidráulica, requer a interconexão de um considerável número de componentes hidráulicos, onde cada um destes tem seu comportamento observado por suas variáveis efeito (respostas) e ditado por suas variáveis causa (excitações), pela sua estrutura e pelos parâmetros internos.

Em geral as falhas aparecem em função da modificação de parâmetros de um ou mais componentes, que é capaz de alterar o desempenho esperado do sistema. Alguns exemplos destes parâmetros são o deslocamento volumétrico e o rendimento de motores e bombas; ganho de vazão, constante de tempo e zona morta em válvulas proporcionais. Estes parâmetros refletem as características estáticas e dinâmicas inerentes a cada componente que podem modificar-se com o tempo de uso, operação com fluido inadequado, operação fora das especificações etc.

* Campus Universitário, Trindade - Cx. P. 476 - CEP 88040-900 - Florianópolis - SC - BRASIL
Tel.: (48) 331-7714 - Fax: (48) 331-7615 - E-MAIL: haddad@emc.ufsc.br

Evidentemente, os efeitos de aviso (ruído, vazamento externo, vibração ou temperatura excessiva), podem fornecer informações importantes na análise (9), o que permite a aplicação da manutenção corretiva no componente.

2.1 Bond Graphs

A metodologia proposta fundamenta-se no emprego de conceitos da técnica de Bond Graphs (Grafos de ligação) como forma de determinar qual parte do sistema pode estar com um comportamento anormal.

Bond Graphs é uma forma de representação de sistemas técnicos por meio de subsistemas conectados por linhas que representam ligações de potência. Em níveis mais altos de abstração, os subsistemas são descritos textualmente e o diagrama é então denominado como Word Bond Graph (4).

A Figura 1(a) mostra um diagrama de circuito de um sistema composto de um motor elétrico acionando uma bomba hidráulica, a qual supre fluido para um sistema hidráulico externo.

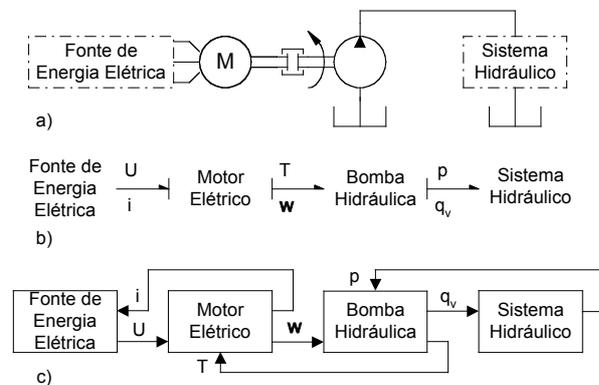


FIGURA 1 - REPRESENTAÇÕES DE UM SISTEMA TÉCNICO: a) DIAGRAMA DE CIRCUITO; b) WORD BOND GRAPH; DIAGRAMA DE BLOCOS.

Um Word Bond Graph correspondente está indicado na figura 1(b) onde a cada ligação estão associadas duas variáveis cujo produto é a potência naquele domínio energético. As variáveis do tipo esforço (Tensão (U), Pressão (p), Força (F), Torque (T)) são dispostas sobre a seta ou no lado esquerdo e as variáveis do tipo fluxo (Corrente (i), Vazão Volumétrica (q_v), Velocidade (v) e Velocidade Angular (ω)) são dispostas abaixo da seta ou no lado direito. A meia seta representa o sentido positivo do fluxo de potência e que ocorre quando as variáveis fluxo e esforço são positivas. Por fim, a linha perpendicular presente em uma das extremidades da ligação determina que a variável esforço é causa (excitação) para o subsistema próximo a esta linha e, conseqüentemente, a variável fluxo é o efeito (resposta) deste mesmo subsistema. Por exemplo, o Torque (T) é uma causa da bomba sobre o motor elétrico e a velocidade angular (ω) é o efeito do motor elétrico sobre a bomba.

O diagrama de blocos (fluxo de sinais) mostrado na Figura 1(c) apresenta as relações causa-efeito entre os

componentes do sistema, não descrevendo o fluxo de potência.

Dentro do contexto de bond graphs, em uma etapa subsequente a descrição textual dos componentes é substituída por efeitos lineares ou não lineares de inércia, resistência e capacitância, possibilitando a obtenção de modelos matemáticos próprios para a realização da análise do comportamento dinâmico (4). Trabalhos como (5) demonstram a utilização desta técnica para a obtenção de modelos de sistemas hidráulicos de controle de posição.

2.2 Análise comportamental dos componentes

Entendendo que o cumprimento de uma função por parte de um sistema é identificado pelos efeitos que este provoca no meio externo, ou seja, manifesta-se nas portas físicas do sistema (1), é natural que se busque observar se as variáveis estão com um comportamento anormal em relação a um determinado padrão. Sabendo-se que as variáveis são o efeito direto de algum subsistema, que por sua vez responde em conformidade com as excitações que este recebe, é possível realizar uma busca criteriosa das causas de anomalias no funcionamento do sistema global. Neste caso os parâmetros de cada componentes são conhecidos ou determinados experimentalmente para prosseguimento da análise.

Nesta etapa, torna-se indispensável conhecer as faixas das variáveis em condições operacionais padrão (conhecidas durante a operação normal do sistema), como faixas de pressões e vazões em vários pontos do sistema, respostas ao degrau e faixa de operação normal da variável controlada (posição, força ou velocidade), faixas de operação dos sinais de realimentação e parâmetros de ajuste do controlador.

A mudança nas variáveis causa e efeito é reflexo de mudança no comportamento estático e/ou dinâmico de um ou mais componentes. Assim sendo, identificado o comportamento indesejado de uma determinada variável, primeiramente verifica-se qual o componente que possui aquela variável como efeito. Logo, este componente pode estar com um funcionamento degradado ou então as variáveis causa dele podem estar provocando esta distorção comportamental.

Se as variáveis causa podem ser medidas, então este deve ser o primeiro passo na investigação e, estando tais variáveis com um comportamento inesperado, deve-se conduzir a investigação primeiramente sobre o componente que tem esta variável como efeito podendo-se, então, aplicar os procedimentos de manutenção corretiva neste componente. A análise descrita acima deve ser conduzida em toda a cadeia de componentes interligados que compõem o sistema hidráulico.

Com base na Figura 1, um exemplo seria a análise da vazão de saída da bomba em função da pressão provocada pelo sistema hidráulico externo. Caso a vazão diminua sensivelmente com o aumento de pressão pode estar ocorrendo uma degradação no funcionamento da bomba (queda de rendimento volumétrico). Porém, caso a rotação gerada pelo motor

elétrico esteja variando, então deve-se investigar inicialmente o efeito desta variação de rotação sobre o comportamento da bomba.

2.2.1 Componentes ou grupo de componentes em malhas de controle

Considerando-se um componente inserido em uma malha de controle, não é possível identificar se o comportamento errático da variável de efeito (resposta) é decorrente do mau funcionamento deste componente ou devido à variável causa para este, já que esta última corresponde ao sinal erro da própria malha de controle. Assim sendo, a análise do comportamento dinâmico deve contemplar todo o sistema em malha fechada, ou de outra forma, um componente somente pode ser inicialmente investigado separadamente se este não estiver em uma malha de controle.

A modelagem e simulação dinâmicas devem ser utilizadas para observar a resposta a causas conhecidas até que o mesmo efeito, observado na variável controlada (posição, velocidade ou força), seja verificado.

Os modelos dinâmicos tratados aqui devem conter todos os componentes e seus parâmetros fundamentais, tais como vazamento interno, efeitos dinâmicos, ganhos de vazão, histerese, zona morta etc. Nestes casos, os efeitos indesejados (falha) observáveis no sistema podem ser velocidade e força incorreta, erro de posição elevado ou emperramento (9).

3.0 CENTRAL HIDRELÉTRICA DE COARACY NUNES

O sistema hidráulico típico de um regulador de velocidade para uma turbina tipo Kaplan apresenta dois circuitos hidráulicos com atuadores independentes, um para o movimento do distribuidor e outro para o movimento das pás do rotor. O movimento das pás ocorre de forma conjugada com o distribuidor, ou seja, a cada posição do distribuidor há uma posição definida para as pás, que também é função da altura de queda de água H.

Especificamente, o sistema de controle das pás do rotor da Central Hidrelétrica de Coaracy Nunes – AM consiste de um circuito hidráulico de controle de

posição representado na Figura 2. A este diagrama foram acrescentadas as setas que caracterizam o fluxo de potência hidráulica, tornando-o também um Word Bond Graph.

Este sistema compreende basicamente três componentes hidráulicos principais que operam interligados, quais sejam: Válvula direcional proporcional, Válvula distribuidora e Servomotor (atuador hidráulico). A válvula direcional proporcional opera por variação da tensão aplicada no solenóide, o que provoca variação proporcional da posição da agulha (1º estágio) e, conseqüentemente, na pressão que atua sobre a área lateral do carretel (2º estágio). O deslocamento do carretel da válvula proporcional altera a área de passagem de óleo através das câmaras de controle, permitindo que a pressão piloto de movimentação do carretel da válvula distribuidora seja controlada adequadamente. Com o deslocamento do carretel da válvula distribuidora, o óleo é direcionado para o lado do servomotor contra a carga, provocando a movimentação do mecanismo de acionamento das pás do rotor (7).

3.1 Análise da Interação entre subsistemas

A fim de ilustrar a utilização da simulação dinâmica na investigação de efeitos indesejados na variável de controle (posição do servomotor), avalia-se o efeito da contaminação do filtro de pressão instalado na entrada da válvula direcional proporcional, o componente mais sensível à contaminação de óleo neste tipo de sistema.

Em Sistemas Hidráulicos de Controle de Posição, o filtro é um exemplo de componente do sistema hidráulico que está fora do laço da malha de controle, entretanto seu comportamento pode influenciar o desempenho estático e dinâmico do controle de posição do servomotor.

Supondo que na análise preliminar dos componentes, conforme procedimento apresentado na seção 2.2, a conclusão tenha sido que a pressão de suprimento da válvula direcional proporcional está com grande flutuação durante operação do sistema, a desconfiança pode recair no filtro de óleo que apresenta como variável de efeito a pressão de saída, isso depois de confirmar que as variações na pressão de suprimento do acumulador estão conforme esperado.

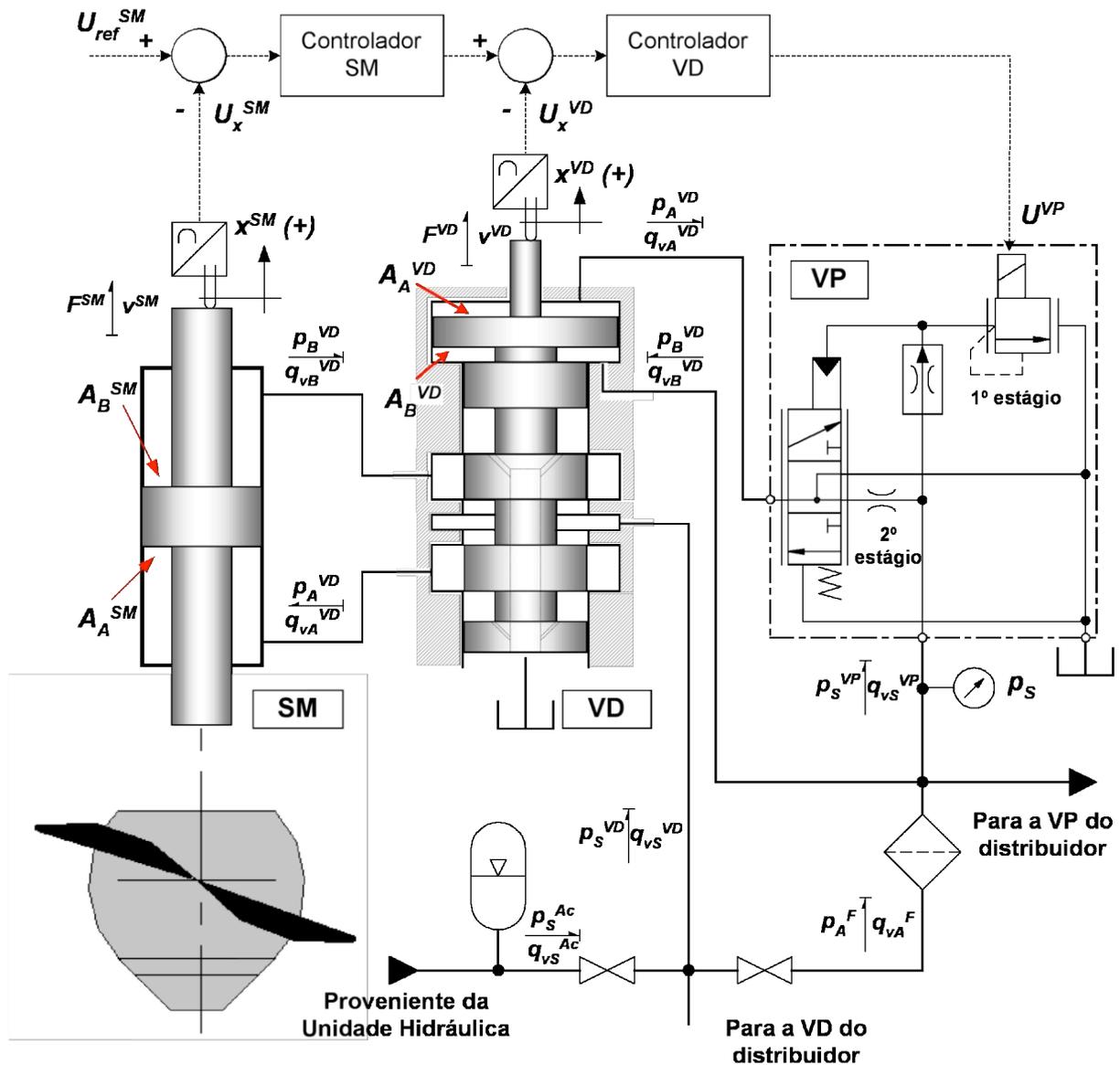


FIGURA 2 – DIAGRAMA HIDRÁULICO E DE CONTROLE DA CENTRAL HIDRELÉTRICA DE COARACY NUNES

Esta análise supõe que o filtro de óleo não tenha by-pass ou indicador de nível de contaminação ou ainda que os transientes que não cheguem a provocar o acionamento do indicador. Utilizando simulação dinâmica, pode-se variar o parâmetro resistência do filtro e analisar o efeito na resposta em degrau do sistema de controle de posição.

O modelo de simulação foi construído no MATLAB assumindo comportamento linear para cada componente do circuito hidráulico. O controlador PI do sistema hidráulico foi incorporado com a configuração original do sistema.

Na Figura 3 é mostrado o resultado da simulação para a variável causa pressão de suprimento na válvula direcional proporcional (pressão de saída do filtro), verifica-se que conforme o nível de contaminação aumenta, a pressão no suprimento da válvula atinge valores cada vez menores. Isso também é notado na vazão, mostrada na Figura 4,

que é uma variável efeito da válvula sobre o filtro. Finalmente, a variável controlada que neste caso é a posição do servomotor apresenta para o degrau um aumento no atraso da resposta (Figura 5). Esse efeito pode provocar, dependendo do nível de contaminação do filtro, a perda na função do sistema, por não atender as condições dinâmicas do sistema de controle. Conhecendo o efeito no controle de posição em função do nível de contaminação do filtro de óleo, pode-se investigar se essa causa provoca o mesmo efeito observado no campo.

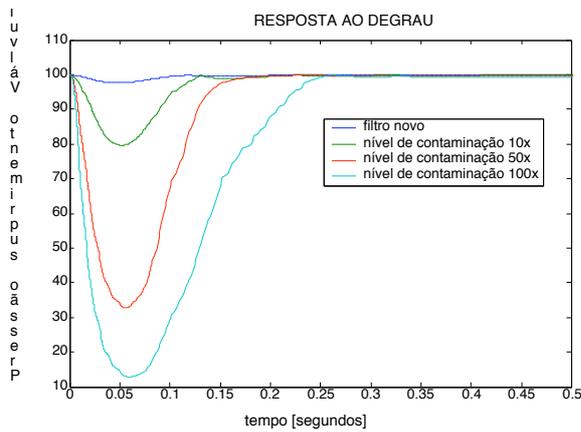


FIGURA 3 – PRESSÃO DE SUPRIMENTO NA ENTRADA DA VÁLVULA PROPORCIONAL PARA RESPOSTA AO DEGRAU COM VARIAÇÕES NO NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO DO FILTRO DE ÓLEO.

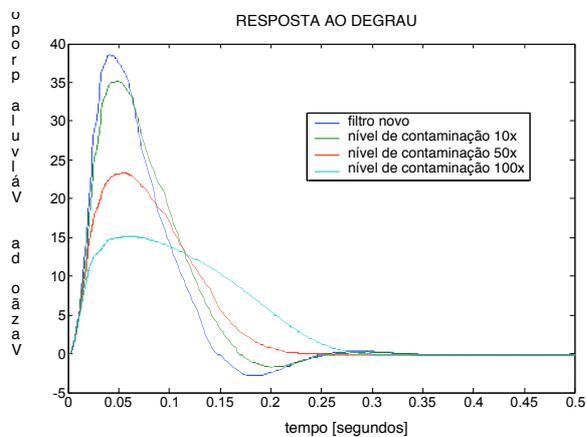


FIGURA 4 – VAZÃO CONSUMIDA PELA VÁLVULA PROPORCIONAL PARA RESPOSTA AO DEGRAU COM VARIAÇÕES NO NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO DO FILTRO DE ÓLEO.

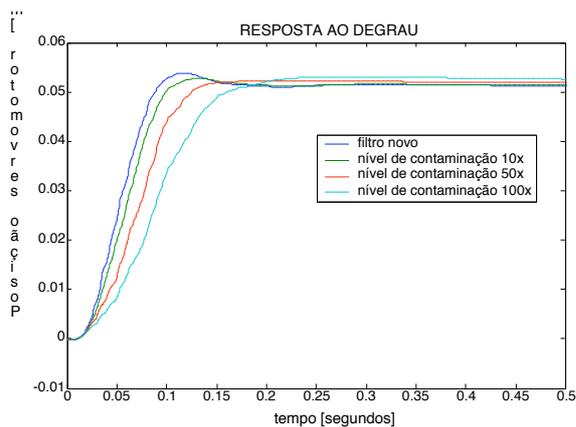


FIGURA 5 – POSIÇÃO DO SERVOMOTOR PARA RESPOSTA AO DEGRAU COM VARIAÇÕES NO NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO DO FILTRO DE ÓLEO.

3.2 Estudo de caso: Interação de componentes dentro de malha e controle

No estudo de caso de Coaracy Nunes descrito em (7), o ponto de partida foi a detecção da perda da função do controle de potência, a qual apresentava flutuações indesejáveis acima do permitido. Sabe-se que em Turbinas Kaplan operando em condições nominais, a potência é fortemente dependente da posição das pás do rotor. Em (7) foi desenvolvida a análise teórica-experimental do Regulador de Velocidade de Coaracy Nunes, através de modelo linear dos componentes do circuito hidráulico. Na Figura 6 são apresentados o resultado medido para posição do servomotor, a resposta do modelo de simulação e o sinal de conjugação com o distribuidor durante operação de desligamento da turbina.

Avaliando-se a Figura 6 pode-se notar que a falha no Sistema Hidráulico de Controle é que a posição do servomotor apresenta alto erro de regime e, nessas condições, a malha de controle de potência (malha externa) não alcança o valor de referência do controlador, causando flutuações na potência gerada pela turbina. Na mesma Figura é apresentado o resultado do Modelo Dinâmico do Sistema Hidráulico desenvolvido em (7), onde pode-se notar que, com parâmetros nominais para os componentes do sistema hidráulico, o erro de posição não apresenta o mesmo comportamento.

Com a determinação da perda da função do Sistema Hidráulico iniciou-se, com a máquina em funcionamento, a medida das variáveis causa e efeito. Primeiramente verificou-se que a unidade de potência e o acumulador operavam dentro da faixa esperada de pressão e tempo de reposição do óleo.

Em seguida (com a máquina parada) foram instalados transdutores de pressão na entrada das válvulas proporcional, distribuidora e câmaras do servomotor. Neste caso, conforme a Figura 2, as pressões nas câmaras A e B do servomotor são efeitos das vazões que entram nas câmaras. Estas devem estar em conformidade com o deslocamento do carretel da válvula distribuidora que apresenta como efeito as vazões que entram nas câmaras. Aqui pode-se ressaltar que os atrasos entre causa (vazão) e efeito (pressão) são relativamente baixas em operações normais. Após análises dos dados experimentais observou-se que todas as pressões operavam dentro do esperado e não ocorriam atrasos significativos entre o sinal de deslocamento do carretel da válvula distribuidora e variação de pressão nas câmaras do servomotor. Neste caso o problema estaria no servomotor ou na cadeia de componentes subsequentes a este.

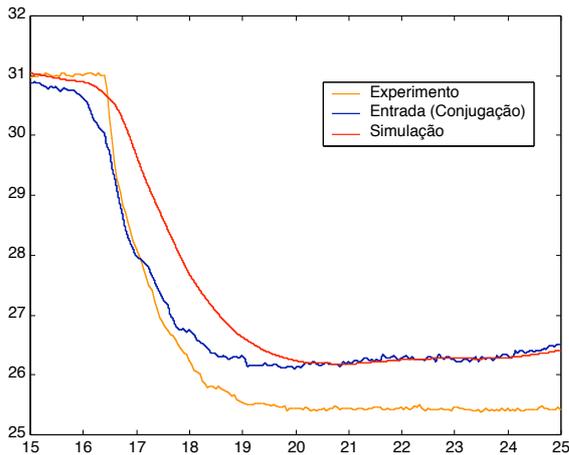


FIGURA 6 – RESULTADOS PARA A POSIÇÃO DO SERVOMOTOR DAS PÁS DO ROTOR DE TURBINA KAPLAN DE COARACY NUNES (7).

Entretanto, com a análise concentrada no transdutor de posição do servomotor notou-se atrasos da ordem de 300 ms entre a posição indicada pelo transdutor e o sinal de referência aplicado na malha de controle, muito acima do esperado que são valores inferiores a 100 ms. Neste caso a referência de posição é a variável causa para o sistema em malha fechada e o efeito é o sinal indicado pelo transdutor, que deveria ser proporcional à referência. Este fato conduziu a investigação para a cadeia de sinais de realimentação das malhas de controle. Ao testar o transdutor de posição do servomotor, o mesmo apresentava histerese muito acima do especificado, o que poderia ser a causa da flutuação da potência. Neste momento a simulação dinâmica pôde ser aplicada para validação da hipótese de que as flutuações no controle da potência poderiam ser causadas pela histerese observada no transdutor de posição.

Através do modelo do sistema hidráulico do regulador de velocidade, incorporando a histerese medida em ensaio de campo, obteve-se o comportamento apresentado na Figura 7. Nota-se que o erro de posição é bastante alto, fazendo com que o controlador provocasse oscilações sem conseguir atingir o erro de regime admissível no projeto. Esse comportamento, avaliado através da simulação dinâmica, comprova que o problema está no transdutor. A partir de manutenção corretiva, mostrou-se que a instalação do transdutor mantinha uma folga mecânica com o mecanismo do servomotor que transmite o deslocamento das pás do rotor. Após correção do defeito a máquina passou a operar sem oscilações no controle de potência.

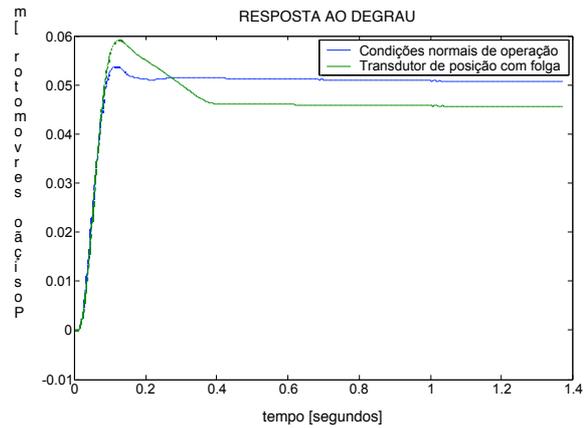


FIGURA 7 – RESPOSTA AO DEGRAU COM 1% DE BACKLASH (FOLGA) NO TRANSDUTOR DA REALIMENTAÇÃO DA POSIÇÃO.

4.0 - CONCLUSÕES

Conforme mostrado nesse artigo a simulação dinâmica de sistemas hidráulicos de controle pode ser utilizada como ferramenta para investigar as causas de falhas. O método apresentado permite diminuir o tempo de parada da máquina pois possibilita uma análise estruturada na busca das causas para anomalias no controle de velocidade ou potência, além de permitir o entendimento físico do sistema de controle.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Chandrasekaran, B. and Josephson, R. Representing Function as Effect. In: AAAI'96 Workshop on Modeling and Reasoning about Function, Portland 1996.
- (2) De Negri, V. J. Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Controle e Automação: Parte III – Sistemas Hidráulicos para Controle. Florianópolis, 2001.
- (3) De Negri, V., Rodrigues, L. A. H. Ensaio e ajustes nos reguladores de velocidade da UHE Coaracy Nunes (Relatório técnico para a REIVAX Automação e Controle, Florianópolis, SC), Florianópolis, Novembro 2000.
- (4) Karnopp, D. C., Margolis, D. L., Rosenberg, R. C. *System dynamics: a unified approach*. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- (5) Kuster, Hímero Emílio. Projeto e Análise de um Servo Atuador Hidromecânico para Aplicação Aeronáutica. 1996. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- (6) Merritt, H. E., "Hydraulic Control Systems", New York, John Wiley & Sons, 1967.
- (7) Rodrigues, L. A. R., De Negri, V.; Análise Teórico-experimental de um circuito hidráulico

de controle de velocidade de turbina em central hidrelétrica. XVI COBEM, Uberlândia, MG, Novembro 2001.

- (8) Soares, J. M., "Identificação Experimental, Simulação e Ajuste de Reguladores de Velocidade de Usinas Hidrelétricas com Verificação em Testes de Campo", Dissertação de Mestrado, Santa Maria-RS, 1982.
- (9) Vinadé, Cesar A., Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicados em sistemas hidráulicos, Tese de doutorado (em conclusão), Florianópolis, SC, 2003.